

LA PLUVIOMETRIE MOYENNE ANNUELLE AU LIBAN INTERPOLATION ET CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE

Mariam Makké Traboulsi

Université Libanaise, Faculté des Lettres, Beyrouth, Liban
traboulsim@yahoo.fr

(Received 19 March 2010 - Accepted 30 July 2010)

RESUME

Les données climatiques au Liban souffrent de la déficience du réseau d'observation particulièrement dans les régions montagneuses. Pour remédier à ce problème, une cartographie automatique des précipitations moyennes annuelles est proposée, par une méthode de « krigeage » tenant compte du relief, grâce à un modèle numérique de terrain (MNT) à la résolution d'une demi-minute d'angle. Cette cartographie a permis de rectifier certaines isohyètes dans les zones mal desservies en stations de mesure. Elle met en évidence des nuances locales liées à l'exposition dans la répartition de la pluviométrie et la présence de noyaux pluviométriques de plus de 1800 mm par an sur les sommets du Liban.

Mots clés: pluviométrie, modèle numérique de terrain, krigeage, Liban

ABSTRACT

Climatic data in Lebanon suffer from the weakness of the station network, especially in the mountainous areas. A solution to the problem is proposed here through the automatic mapping of the yearly precipitation averages using kriging, while taking into account the local topography through a digital elevation model with a half-minute resolution (DEM). This method rectified several isohyets in the areas poorly covered by observation stations. It highlighted variations of rainfall due to the local topography, and confirmed the presence of areas receiving over 1800mm/year on the uppermost summits of the country.

Keywords: pluviometry, digital elevation model, kriging, Lebanon

INTRODUCTION

La région du Proche-Orient est l'une des plus arides de la Terre. Le Liban, qui fait partie des arcs montagneux bordant le Proche-Orient à l'ouest et au nord, a toujours été considéré comme un château d'eau. Pourtant, le développement du niveau de vie et la forte croissance démographique entraînent des besoins accrus en eau. Ainsi une gestion rigoureuse de l'eau est nécessaire, d'autant plus que : la saison sèche est très longue, les ressources en eau sont liées directement aux précipitations, avec une topographie défavorable, qui varient

beaucoup dans le temps et dans l'espace, à l'image de la dynamique de l'atmosphère (Folland *et al.*, 1991; Traboulsi, 2004). Les précipitations neigeuses représentent une part importante au Liban, elles alimentent les nappes souterraines et atténuent les effets de cette variabilité.

La distribution et la variabilité des précipitations conditionnent la gestion de l'eau. La variabilité des apports sous forme de pluie impacte de nombreuses activités au Liban, en premier lieu la production agricole qui, loin de suffire aux besoins du pays, ne peut même pas nourrir la population rurale. L'arboriculture dominante au Liban demande de grandes quantités d'eau. Le rationnement en eau et en électricité est devenu la règle lors des mauvaises années ; toutes les activités humaines sont alors perturbées.

Gérer ce problème demande d'abord une bonne estimation de la lame d'eau tombée. Toutefois, les études climatologiques sont confrontées à la rareté des données climatiques. Les travaux récents de climatologie sont très rares au Liban. En dehors des articles anciens de Plassard sur les précipitations ou la pression atmosphérique à Beyrouth ou à Ksara (1964 ; 1969a ; 1969b ; 1970 ; 1971 ; 1973), ou de Blanchet, traitant des précipitations et du régime thermique de Beyrouth-Damas (Blanchet, 1965 ; 1967), ou des types de circulation atmosphérique lors des épisodes pluvieux exceptionnels (Blanchet, 1972 ; 1993 ; Blanchet & Traboulsi, 1993 ; 1999). La thèse de Blanchet (1976) demeure le travail le plus complet à ce jour sur le climat du Liban. On peut rappeler pour mémoire que des thèses de géographie physique ont traité partiellement du climat du Liban, mais elles sont elles aussi anciennes (Sanlaville, 1977 ; Hakim, 1985).

Quant à l'estimation de la lame d'eau, deux cartes pluviométriques ont été faites successivement par Rey (1954) et Plassard (1972). La carte de Rey montre plusieurs imperfections : nuances locales ignorées, pluviométrie sur les hauts sommets non précisée, pluies exagérées dans certaines régions (Machghara). Malgré la nette amélioration apportée par la carte de Plassard les nuances locales sont toujours ignorées et la pluviométrie sur les hauts sommets reste imprécise. Ces imperfections sont surtout liées aux moyens techniques d'interpolation de la pluviométrie utilisés à l'époque.

Plus récemment, une carte pluviométrique a été établie par Laborde et Traboulsi (2002) couvrant le Proche-Orient (Liban, Syrie, Jordanie, Israël et Territoire Autonome Palestinien). Cette cartographie de la pluviométrie a donné des résultats très satisfaisants pour la Syrie. Pour le Liban, au relief fortement contrasté, l'échelle de la carte n'est pas adaptée et ne permet pas de rendre compte précisément de la diversité de répartition des précipitations. La méthode de calcul utilisée - gradients altimétriques par fenêtres glissantes - n'a pas donné des résultats fiables à cause de l'absence complète des stations pluviométriques dans certaines régions libanaises. Aussi, ici une nouvelle méthode de cartographie automatique est proposée, utilisant un modèle numérique de terrain (Figure 1). Mais il convient de préciser que les données climatiques du Liban souffrent de grandes lacunes, notamment entre 1975 et 1990 à cause de la guerre civile, et après 1990 car la remise en place du réseau de stations opérationnelles n'a été que très progressive. La méthode développée est par conséquent testée à partir de données anciennes.

Le climat au Liban est la résultante de plusieurs facteurs géographiques qui, en se conjuguant, contribuent à une originalité climatique frappante qui réside, comme toutes les régions méditerranéennes, dans sa sécheresse estivale associée à des températures élevées et à la douceur de la saison pluvieuse (Bolle, 2002) :

- situation en latitude aux marges nord des déserts arabo-sahariens et sud de la zone tempérée ;
- façade ouest de domaine continental où se rencontrent les trois « vieux continents », bordée à l'ouest, non par le plein océan mais par une mer semi-fermée subtropicale (relativement chaude) ;
- présence de deux chaînes montagneuses (Liban et Anti-Liban) qui se dressent parallèlement à la côte orientale de la Méditerranée (Figure 1). La disposition du relief joue un rôle très important dans la répartition spatiale de la pluviométrie.

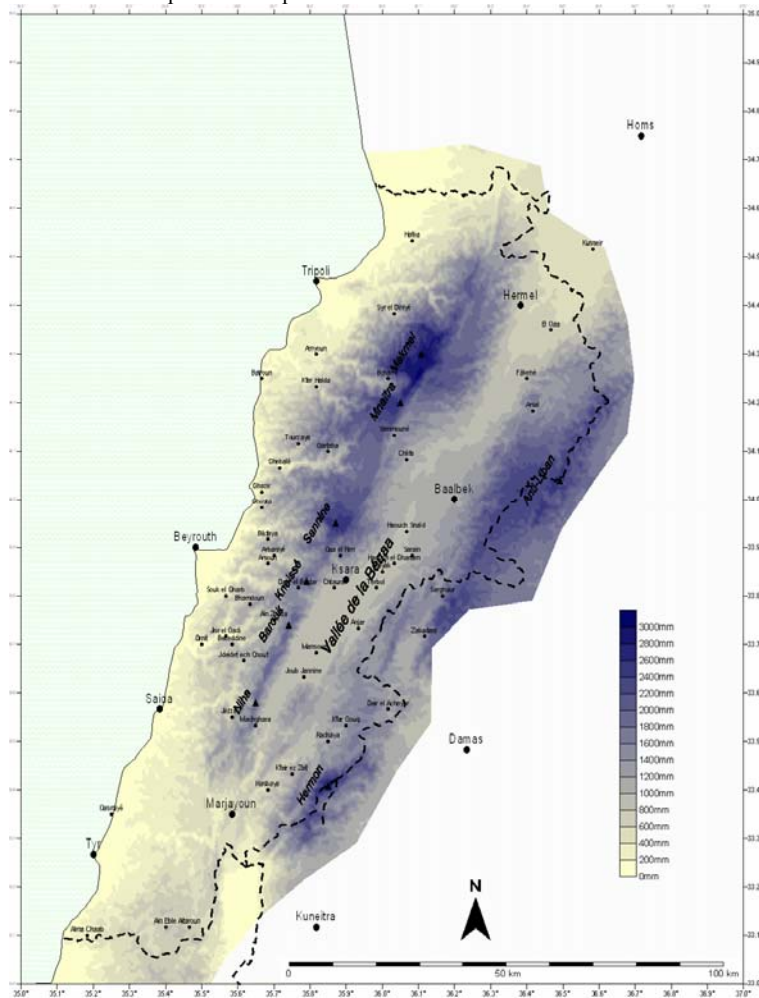


Figure 1. Modèle numérique de terrain.

DONNEES ET METHODE

Traitement des données

Les données pluviométriques du Liban, recueillies directement auprès du Service météorologique et de l'Office du Litani, comportent de nombreuses lacunes et leur fiabilité est parfois problématique. Les observations les plus anciennes datent d'une centaine d'années. C'est en 1876 qu'a été créée la station de l'Université Américaine de Beyrouth. Le nombre de stations a augmenté au fil des années (28 en 1940, 61 en 1950) pour atteindre 121 en 1970 (Blanchet, 1976). Malheureusement, la plupart de ces stations se sont arrêtées pendant la guerre civile (1975-1990) et seules trois stations possèdent des séries complètes : Beyrouth-Aéroport (AIB), Ksara et Tripoli.

L'hétérogénéité des séries d'observations crée donc un grand problème. Le deuxième problème qui se pose est la dissymétrie dans la répartition des postes d'observations et l'absence quasi complète de stations dans les zones élevées, et particulièrement dans la chaîne orientale.

Pour cette étude, une période de 30 années hydrologiques allant de 1944-45 à 1973-74 a été retenue. Pour assurer une bonne couverture spatiale, il fut jugé intéressant d'utiliser aussi les données des stations possédant une série d'observations inférieures à 30 ans (20 ans et plus) (Figure 1). Pour avoir une interpolation fiable des pluies annuelles dans l'Anti-Liban et au nord du pays, on a eu recours aux données de quelques stations syriennes situées sur la frontière entre les deux pays.

L'estimation des manques (de certains mois) que présentent quelques stations du réseau utilisé a été effectuée quand ceux-ci ne dépassaient pas 10 % (sur l'ensemble de la série d'une station) du nombre d'observations afin d'assurer un maillage géographique régulier.

Les estimations ont été réalisées par régression simple ou multiple (Groupe Chadule, 1994 ; Saporta, 1990), à partir des stations voisines. La sélection des régresseurs a été faite en utilisant une régression « pas à pas ». Le résultat est régionalement assez cohérent.

Méthode cartographique

Il existe manifestement un rapport étroit entre le relief et la répartition spatiale des précipitations (Benichou & Le Breton, 1987 ; Daly *et al.*, 1994 ; De Montmollin *et al.*, 1980 ; François & Humbert, 2000 ; Humbert & Perrin, 1993 ; Humbert, 1995 ; Humbert *et al.*, 1997 ; Humbert *et al.*, 1998 ; Laborde, 1982 ; 1984 ; 1991 ; 1995 ; Laborde & Traboulsi, 2002 ; Peck & Brown, 1962 ; Shérer, 1977). Pour mettre en évidence cette influence du relief, la cartographie des précipitations a été établie par « krigeage » en tenant compte du relief. Le relief est pris en compte grâce à un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à la maille d'une demi-minute d'angle (Depraetere, 1998), ce qui est largement suffisant pour une étude pluviométrique générale. On a supposé que la pluie moyenne annuelle $P(x)$ en un point x quelconque du territoire était la somme d'une composante régionale $p_0(x)$ (pluie au niveau de la mer) et d'un effet d'altitude $z(x) * g_0(x) * e^{-\alpha d}$, où $g_0(x)$ est un gradient altimétrique des précipitations à la côte:

$$P = p_0 * e^{-\alpha d} + g_0 * e^{-\alpha d} * z$$

p_0 : pluie estimée au niveau de la mer.
 g_0 : gradient pluviométrique à la côte.
 d : distance à la mer.
 α : paramètre qui désigne la vitesse du changement de gradient.
 Z : l'altitude.

p_0 , g_0 et α sont les trois variables qui consistent à minimiser le carré des écarts entre les pluies observées et les pluies estimées dont les valeurs sont respectivement de 810,3 ; 0,92 et 2,37.

La pluviométrie en un point de territoire dépend, donc, d'une composante régionale et d'une composante locale. La composante locale intègre l'influence du relief ainsi que celle de la position du point. Il est en effet bien connu que deux sites dont le contexte morphométrique est similaire ne reçoivent pas la même quantité pluviométrique selon leur positionnement par rapport aux masses d'air : il pleuvra plus sur le site exposé aux vents humides que sur le second site placé « sous le vent » (cet effet de positionnement au ou « sous le vent » peut-être pris en considération par la distance à la mer dans le cas précis du Liban dont les massifs montagneux sont orientés parallèlement à la mer et perpendiculairement aux mouvements des masses d'air humides). D'où l'intérêt d'intégrer les coordonnées géographiques X et Y d'un point quelconque du territoire, le relief et la distance à la mer (Davtian, 1998).

Dans le cas du Liban, il existe un rapport négatif entre la pluviométrie et la distance des stations par rapport à la mer, qui traduit une baisse de la pluviométrie sur les pentes orientales du mont Liban disposées « sous le vent » par rapport au flux humide.

On a calculé la distance des stations à la mer (ligne de côte) selon la formule suivante :

$$d = \min \sqrt{(Xa - Xcôte)^2 + (Ya - Ycôte)^2}$$

Avec :

Xa, Ya : coordonnées géographiques des stations

$Xcôte, Ycôte$: coordonnées géographiques des points de la ligne de côte.

La Figure 2 montre les différentes étapes de cartographie. Sous Surfer, (Surfer 8.0, logiciel de cartographie automatique), la grille des distances à la mer a été établie en partant des coordonnées géographiques de la ligne de côte et des stations utilisées.

La grille des pluies estimées (figure 4) est obtenue par la somme de deux grilles : $810,3 * e^{-2,37d}$ et $0,92 * e^{-\alpha d} * z$. 810,3 est la pluie au niveau de la mer ; d est la grille des distances à la mer ; 2,37 est la vitesse du changement de gradient ; 0,92 est le gradient des précipitations au niveau de la mer ; z est la grille des altitudes (MNT). Les trois paramètres p_0 , g_0 et α sont calculés (Excel, solveur) d'une façon à minimiser le carré des écarts entre les pluies observées et les pluies estimées.

La grille des précipitations finales n'est que la somme de deux grilles ; celle des pluies estimées et celle des résidus qui sont interpolés par krigeage.

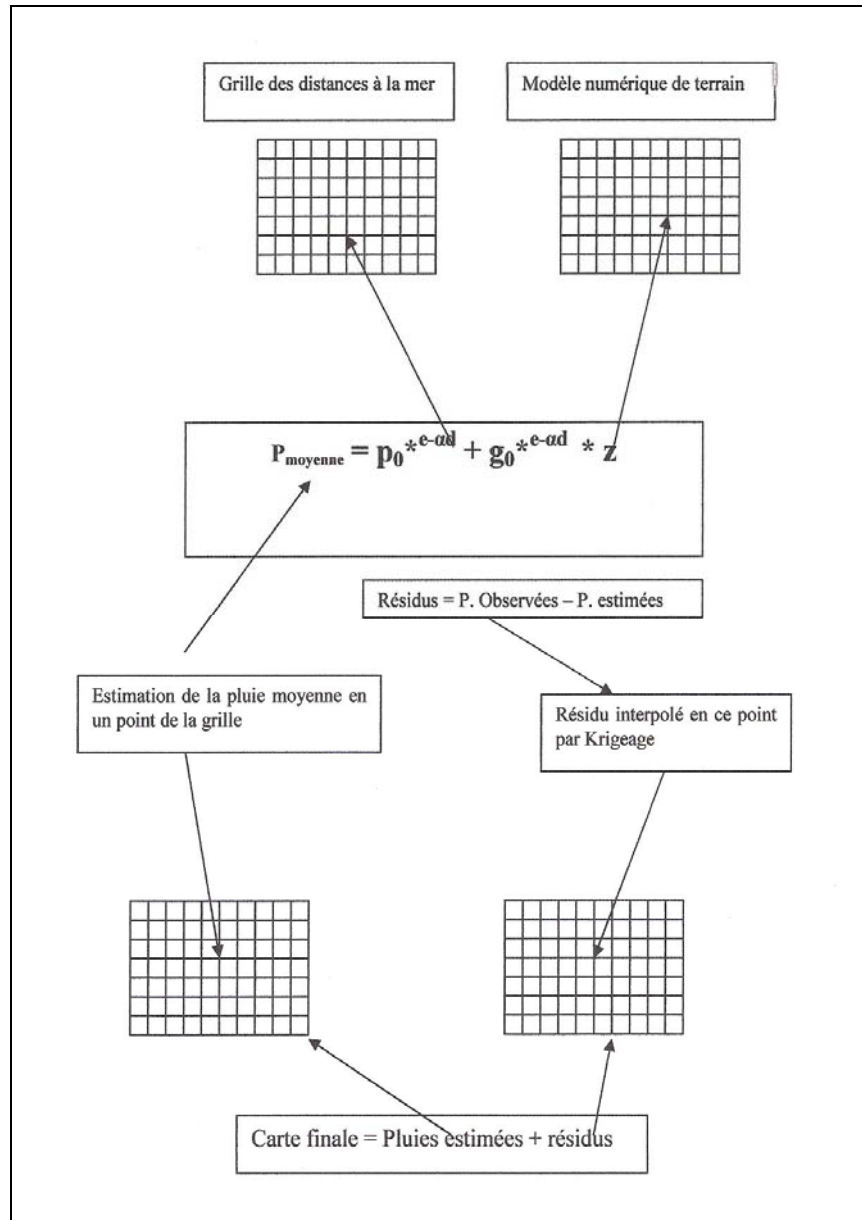


Figure 2. Schéma des différentes étapes de la cartographie.

La pluviométrie en un point donné sera donc fonction de celle estimée au niveau de la mer variant en fonction de la distance à la mer ($p_0 * e^{-\alpha d}$) et de l'effet du relief ($g_0 * e^{-\alpha d} * z$), tout en sachant que les gradients pluviométriques changent aussi en fonction de la distance à la mer, et sans oublier l'effet d'abri (sous le vent/au vent) (Figure 3).

En chaque station, on connaît les précipitations moyennes annuelles observées ainsi que leur estimation à partir de l'équation citée plus haut. Ainsi le résidu des pluies en un point donné sera :

$$\text{Résidu} = P_{\text{observée}} - P_{\text{estimée}}$$

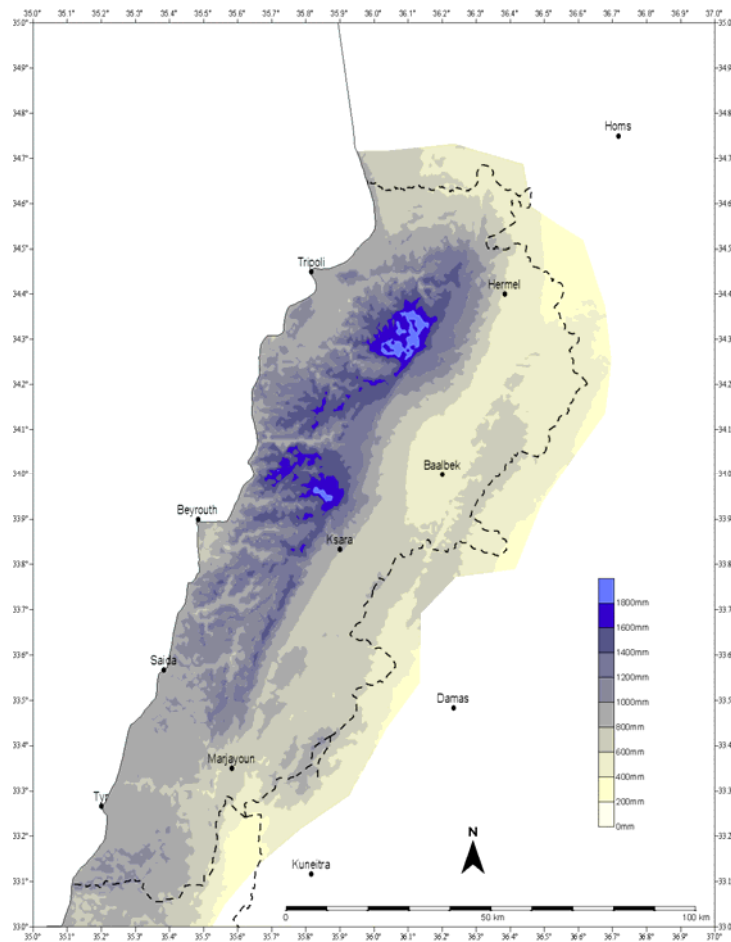


Figure 3. Carte des pluies estimées selon le modèle proposé.

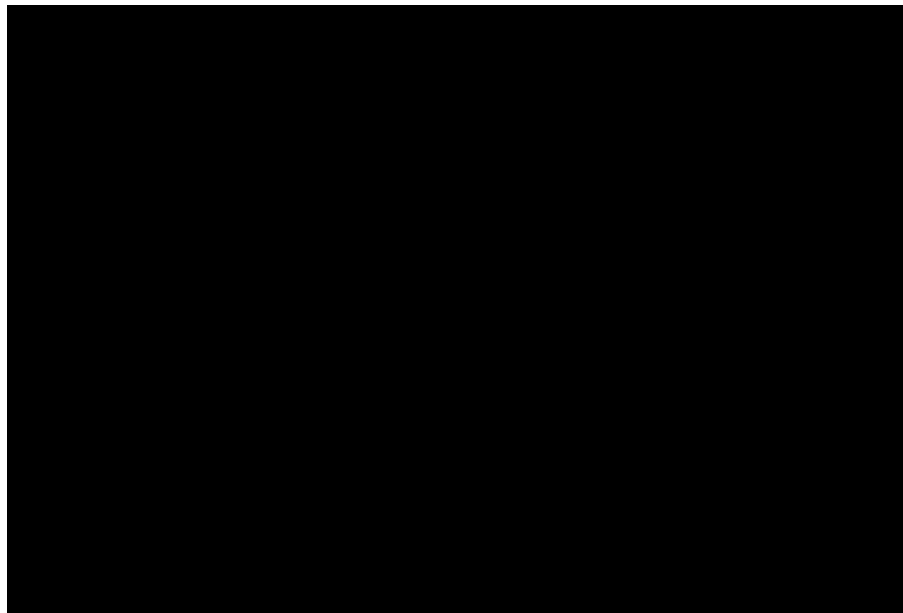


Figure 4. Régression entre les pluies observées (réelles) et les pluies estimées.

La Figure 4 visualise la qualité de l'estimation obtenue par le modèle appliqué sur les données réelles.

Ces résidus sont stationnaires d'ordre 2, c'est-à-dire qu'ils sont nuls en moyenne et de variance constante. Ils varient avec la position dans l'espace : ils se prêtent facilement à une interpolation (Laborde, 1995). Ils ont été interpolés par krigeage. Pour modéliser le variogramme (Surfer 8.0), le modèle exponentiel a été retenu:

$$\gamma(h) = \sigma^2 (1 - e^{-h/p})$$

Le palier σ^2 et la portée p ont été ajustés graphiquement de manière à ce que le modèle théorique passe « au mieux » au milieu du nuage de points. Le modèle retenu est donc de portée 0.19° et de palier $30\,000\text{ mm}^2$ (Figure 5).

Ces résidus possèdent une fonction de structure que montre bien le variogramme (Figure 5). Les pluies varient selon une structure déterminée jusqu'à une distance de 0.19° et, ensuite, elles varient de manière aléatoire.

Cette interpolation a permis de tracer la carte des résidus (carte krigée conformément au variogramme). Ces résidus représentent la part de la variance non expliquée par le modèle proposé. D'autres facteurs interviennent dans la distribution de la pluviométrie : l'effet d'abri et l'éloignement de la mer (comme le montre la carte des résidus (Figure 6) dans la Béqaa du Nord, les résidus sont négatifs), la proximité du relief à la côte qui augmente le volume pluvieux (résidus positifs) ou son orientation par rapport aux flux pluvieux de SW.

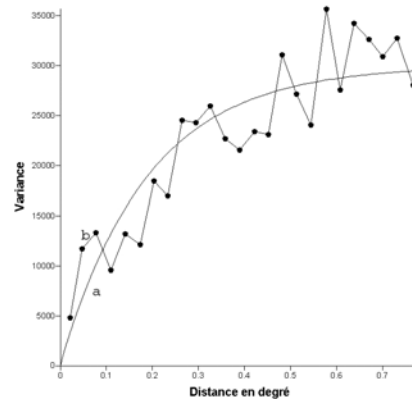


Figure 5. Variogrammes expérimental et théorique pour les résidus des pluies annuelles.
a- modèle théorique. b- variogramme expérimental.

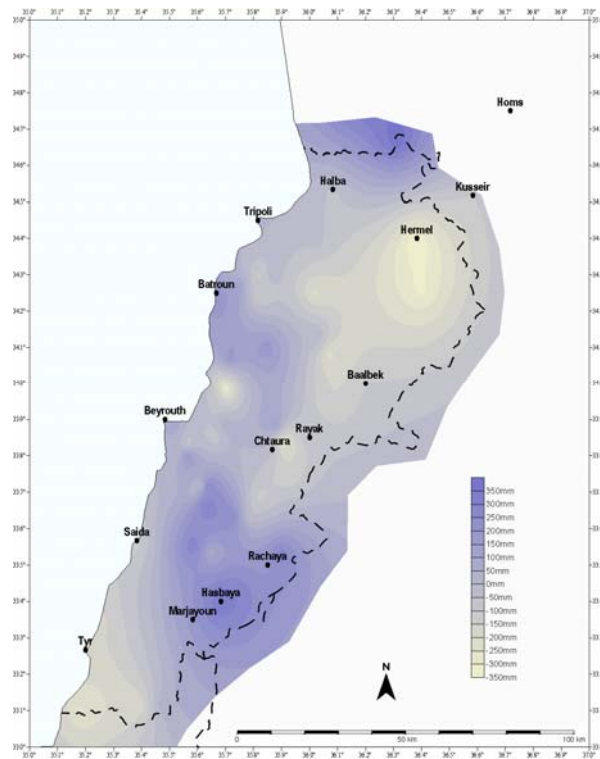


Figure 6. Carte des résidus.

La carte des précipitations moyennes annuelles (Figure 7) peut alors être obtenue par combinaison des deux sources d'information suivantes :

- la carte des pluies estimées en fonction du relief, de la position de chaque point par rapport à la mer (Figure 4) ;
- la carte des résidus (carte krigée conformément au variogramme observé (Figure 6)).

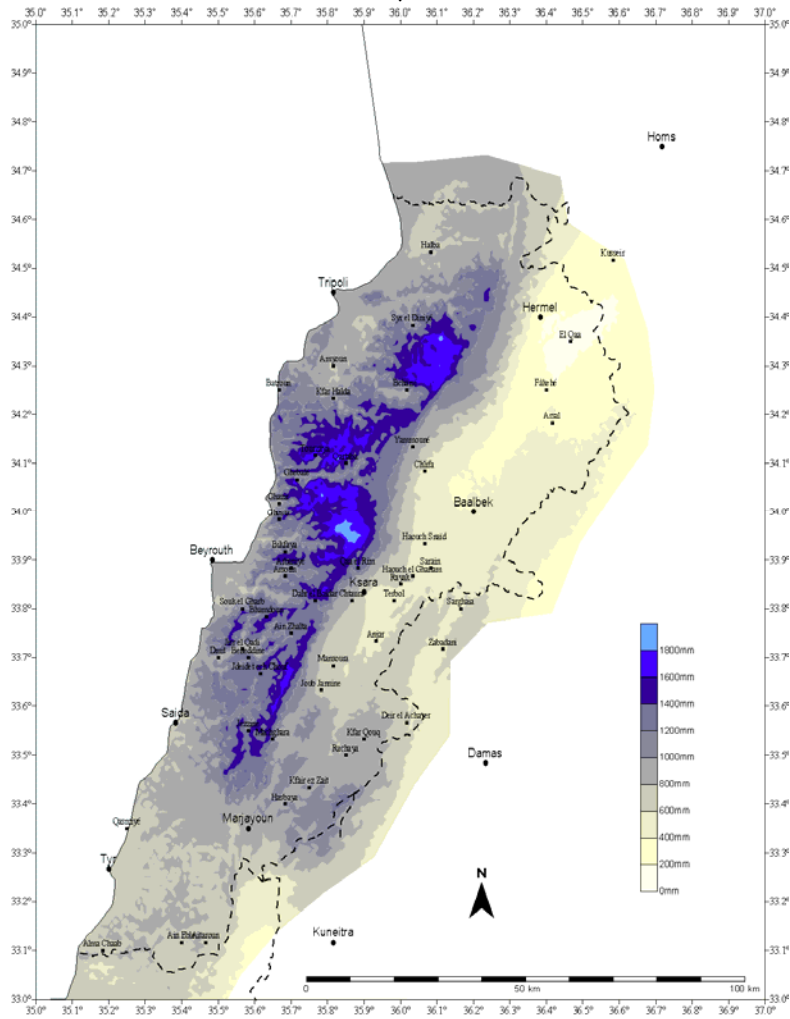


Figure 7. Carte de la pluviométrie moyenne annuelle.

RESULTAT ET DISCUSSION

La disposition du relief oppose des régions « au vent », bien arrosées, recevant aux alentours de 900 mm par an sur la côte (1 800 mm sur les sommets montagneux) et des régions « sous le vent » abritées par la chaîne montagneuse dressée parallèlement au littoral. La pluviosité diminue donc rapidement à mesure que l'on va vers l'est et le nord-est ; en franchissant la barrière montagneuse, les vents perdent une grande partie de leur humidité, l'air se comprime dans son mouvement de descente et se réchauffe, donc il se dessèche (effet de *föhn*) : on enregistre moins de 200 mm dans la Béqaa du Nord, où l'effet d'abri est particulièrement accentué à l'est des points culminants du Mont-Liban.

Une nette diminution de la pluviométrie est aussi à signaler à mesure que l'on va vers le sud, mais le gradient y est moins fort. Ici la topographie s'abaisse et le rôle de la latitude, comparativement, se fait davantage sentir ; on passe de plus de 800 mm par an sur la côte nord à moins de 700 mm, dans l'extrême sud du pays.

Pour l'ensemble du Liban, la cartographie des précipitations moyennes annuelles montre clairement :

En dehors de la Béqaa du Nord, les précipitations sont fortes sur l'ensemble du pays bien que des nuances régionales ou locales apparaissent en fonction de plusieurs paramètres : altitude, latitude, continentalité et particulièrement exposition.

La région côtière

Elle reçoit généralement 700 à 900 mm de pluie par an. Cette quantité augmente pour dépasser 1000 mm au nord de Beyrouth, région située en avant du massif montagneux.

Plus au nord, la plaine du Akkar est sensiblement moins arrosée (750 à 800 mm) ; car c'est une région basse et qui n'est bordée à l'est par aucun relief important.

Le sud du pays est également moins arrosé. Les précipitations diminuent sensiblement au sud de Beyrouth pour tomber à moins de 700 mm au sud de Tyr, en raison de la position plus méridionale, (les perturbations pluvieuses devenant moins actives faute d'alimentation en air froid) et de l'abaissement du relief.

La chaîne occidentale (Mont-Liban)

Les précipitations augmentent rapidement avec l'altitude avec un gradient très fort, notamment sur le massif qui surplombe la mer au nord de Beyrouth. Toutes les parties sommitales de la chaîne occidentale totalisent une quantité annuelle moyenne de plus de 1600 mm. Un secteur à plus de 1800 mm coiffe le massif du Sannine alors que cette isohyète ne fait apparaître qu'un noyau minuscule sur le massif du Laqlouq et celui du Makmel. Les précipitations diminuent relativement sur la région du Chouf (1400 mm). On peut remarquer que le massif du Sannine est plus arrosé que celui du Makmel, bien qu'il soit moins élevé (2628 m) que le second (3090 m). C'est parce que le Sannine est sensiblement plus proche de la mer et que d'autre part la trajectoire des perturbations pluvieuses est SW-NE étant donné que les vallées planétaires d'altitude (niveau 500 hPa, c'est-à-dire coulées d'air froid) sont

orientées en général SW-NE sur le Proche-Orient (Traboulsi, 2004 ; Traboulsi & Camberlin 2004). Cela favorise le Sannine, alors que le Makmel se trouve relativement abrité.

Ce modèle de cartographie fait ressortir un maximum de précipitations vers 2500 m (les noyaux de forte pluviométrie correspondent à cette altitude), mais l'absence totale de stations sur les hauts sommets ne permet pas de confirmer ce résultat.

Dans la région du sud, où les collines se succèdent, les précipitations moyennes sont nettement plus faibles, avec de grandes différences locales qui apparaissent en fonction de l'altitude et de l'exposition (effet d'abri). Cette diminution de la pluviométrie s'explique à la fois par la latitude et le caractère moins prononcé du relief. Le massif montagneux s'abaisse et devient plus étroit. La pluviométrie moyenne annuelle tombe à moins de 800 mm par an.

La topographie de la chaîne occidentale (pentes raides ou faible largeur) permet au versant oriental de rester bien arrosé, ce que montre les quantités enregistrées à Yammouné, Qaa el Rim ou Machghara.

La Béqaa

La plaine de la Béqaa, enserrée entre les deux chaînes montagneuses, se trouve « sous le vent ». Les masses d'air perdent une grande partie de leur humidité sur les versants ouest de la chaîne occidentale et subissent l'effet de *fœhn* en redescendant. Le fait le plus remarquable est la diminution de la pluviosité en sens inverse de l'altitude de la chaîne occidentale. La pluviométrie diminue également du sud vers le nord. Les stations méridionales reçoivent généralement plus de 700 mm. Dans la partie centrale, l'effet de *fœhn* est remarquable : tandis que Qaa el Rim (1320 m) reçoit plus de 1300 mm par an, Zahlé, situé à 990 m d'altitude et à seulement 6 km au sud-est, ne reçoit que 685 mm.

Plus au nord, les précipitations diminuent rapidement pour atteindre moins de 200 mm par an à l'est (ou à l'abri) du massif du Makmel, point culminant du mont Liban. Le climat de cette région est aride.

La chaîne orientale

Elle est abritée par la chaîne occidentale, particulièrement dans sa partie septentrionale, l'Anti-Liban. Selon ce modèle, l'Anti-Liban (dépourvu malheureusement de toute station de mesure) reçoit entre 400 (au nord) et 600 mm (au sud).

L'Hermon, situé au sud (2814 m), ne dispose que de quelques stations sur ses versants occidentaux. Malgré sa position en latitude, il est relativement bien arrosé ; une zone à plus de 1200 mm coiffe son sommet (selon le modèle cartographique) en raison de la moindre altitude de la chaîne occidentale qui l'abrite et du seuil de Marjayoun qui laisse passer les vents humides.

CONCLUSION

L'étude de la pluviométrie moyenne annuelle au Liban fait ressortir le rôle prépondérant du relief dans la répartition spatiale des précipitations. La carte de la

pluviométrie est en grande partie calquée sur la carte du relief, sans oublier toutefois le rôle des autres facteurs géographiques (latitude, continentalité et surtout l'effet d'abri).

L'utilisation pour la première fois d'un modèle numérique de terrain a permis de rectifier certaines isohyètes dans les zones mal desservies en stations de mesures. Toutefois, l'absence de données dans ces zones n'a pas permis de procéder à une évaluation quantitative de ces prédictions. Cette méthode a permis de concrétiser la présence de noyaux pluviométriques de plus de 1800 mm, qui restaient jusque-là théoriques, notamment sur le massif du Sannine.

On a mis en évidence, dans la répartition de la pluviométrie, des nuances locales liées à l'exposition (effet d'abri), particulièrement dans le sud du pays et sur la façade ouest : les vallées orientées E-W ou SW-NE présentent des rentrants de faible pluviométrie par rapport aux montagnes avoisinantes.

Cette cartographie des précipitations moyennes annuelles présente certaines imperfections liées essentiellement aux déficiences du réseau d'observation et aux lacunes des données pluvieuses. En conséquence, la rénovation de ce réseau, mais surtout son extension dans les régions montagneuses demeurent une nécessité impérative pour la fiabilité des données dans le futur.

REMERCIEMENTS

J'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude à Monsieur Jean-Pierre Laborde, professeur à l'université de Nice Sophia Antipolis de m'avoir accueilli dans son laboratoire, de m'avoir initiée à la cartographie automatique. Sans lui, ce travail n'aurait pas vu le jour.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur Mohammed Assaba, Docteur Ingénieur à Nice, qui m'a fourni toutes les explications nécessaires à la réalisation de ce travail.

Ce travail a eu lieu grâce au programme de soutien à la recherche de l'Université Libanaise.

REFERENCES

- Benichou, P. et Le Breton, O. 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 9 : 23-34.
- Blanchet, G. 1965. Le climat de Beyrouth. *Revue de Géographie de Lyon*, 40 : 131-158.
- Blanchet, G. 1967. Les régimes thermiques de Beyrouth et de Damas : étude comparée. *Hannon*, 2 : 117-124.
- Blanchet, G. 1972. Les précipitations exceptionnelles de décembre 1968 et janvier 1969 au Liban. *Hannon*, 7 : 3-27.
- Blanchet, G. 1976.: *Le temps au Liban, approche d'une climatologie synoptique*. Thèse de 3^e cycle, Lyon. T. I : 477 p. (texte et tabl.), T. II : (Atlas).
- Blanchet, G. 1993. Circulation atmosphérique et précipitations au Liban. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 6 : 325-332.

- Blanchet, G. et Traboulsi, M. 1993. Froid, pluie, neige et tempête au Proche-Orient durant l'hiver 1991-92. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 6 : 433-441.
- Blanchet, G. et Traboulsi, M. 1999. L'épisode de Khamsin de la mi-mars 1998 au Proche-Orient. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 12 : 387-395.
- Bolle, H.-J. 2002. *Mediterranean climate: variability and trend*. Springer-Verlag, Berlin, 450 pp.
- Daly, C., Neilson, R.P., Phillips, D.L. 1994. Statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *J. Appl. Meteorol.*, 33 :140-158.
- Davtian, G. 1998. *Analyse des données et cartographie automatique : applications aux principales variables climatiques du versant méditerranéen du Maghreb*. Thèse de doctorat, Université de Nice, 328 p. + Atlas, 34 p.
- Depraetere, C. 1998. *Nova Totius Terrarum*. Logiciel de traitement du modèle numérique du terrain mondial, I.R.D., Montpellier.
- De Montmollin, F.A., Olivier, R.J., Simard, R.J., Zwahlen, F. 1980. Evaluation of a precipitation map using a smoothed elevation-precipitation relationship and optimal estimates (kriging). *Nordic hydrology*, 11: 113-120.
- Folland, C.K., Owen, J., Ward, N.M., Colman, A. 1991. Prediction of seasonal rainfall in the Sahel region using empirical and dynamical methods. *Journal of Forecasting*, 10 : 21-56.
- François, D., Humbert, J. 2000. Quantification spatiale des précipitations. Application au nord-est de la France. *Revue de Géographie de l'Est*, p. 1-16.
- Groupe Chadule 1994. *Initiations aux pratiques statistiques en géographie*. 3^{ème} édition, Masson, Paris, 203 p.
- Hakim, B. 1985. *Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens : Liban, Syrie et Maroc*. Publications de l'Université Libanaise, tome 1, 701 p., tome 2, atlas.
- Humbert, J. 1995. Cartographie des précipitations mensuelles et annuelles en zones montagneuses. *Annales de Géographie*, (581-582) : 168-172.
- Humbert, J. et Perrin, J.L. 1993. Précipitations et relief ; le cas du versant oriental des Hautes Vosges. In : *L'eau, la terre et les hommes*. Presses Universitaires de Nancy, p. 147-154.
- Humbert, J., Perron, L. et Perrin, J.L. 1997. Precipitation mapping in mountainous areas. Comparison of two statistical models. Proceedings of the International Conference "Developments in hydrology of mountainous areas". Friend-A.M.H.Y.-IHP V, High Tatras, Slovakia, *Technical Document in Hydrology*, n°8, U.N.E.S.C.O., Paris, p. 70-75.
- Humbert, J., Drogue, N., Mahr, N. 1998. *Cartographie des précipitations par paramétrisation omnidirectionnelle du relief : la méthode Pluvia*. Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie.
- Laborde, J.P. 1982. Cartographie automatique des caractéristiques pluviométriques, prise en compte des relations pluviométrie-morphométrie. *La Houille Blanche*, (4) : 330-338.
- Laborde, J.P. 1984. *Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie : Éléments d'hydrologie Lorraine*. Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, École Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière de Nancy, Nancy, 484 p.

- Laborde, J.P. 1991. *Méthodes d'interpolation et géostatistiques pour la cartographie automatique à l'usage des géographes*. Université de Nice, 29 p.
- Laborde, J.P. 1995. Les différentes étapes d'une cartographie automatique : exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 8 : 37-46.
- Laborde, J.P. et Traboulsi, M. 2002. Cartographie automatique des précipitations : application aux précipitations moyennes annuelles du Moyen-Orient. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 14 : 296-303.
- Peck, E.L., Brown, M.J. 1962. An approach to the development of isohyetal maps for mountainous areas. *J. Geophys. Res.*, 67 : 681-694.
- Plassard, J. 1964. *Etude statistique de la fréquence des fortes pluies à Beyrouth*. Beyrouth, Direction centrale de la statistique, 16 p.
- Plassard, J. 1969a. Dix sept années de pluie (1950-1967) à Beyrouth. Ksara, *Annales-Mémoires de l'observatoire de Ksara*, tome 3, cahier 2, 17 p.
- Plassard, J. 1969b. Etude des pluies à Ksara. Ksara, *Annales-Mémoires de l'observatoire de Ksara*, tome 3, cahier 3, 11 p.
- Plassard, J. 1970. Fréquence des fortes pluies sur Beyrouth et sa banlieue. Ksara, *Annales-Mémoires de l'observatoire de Ksara*, tome 3, cahier 4, 18 p.
- Plassard, J. 1971. La pression atmosphérique à Beyrouth au niveau de la mer et en altitude. Ksara, *Annales-Mémoires de l'observatoire de Ksara*, tome 3, cahier 5, 13 p.
- Plassard, J. 1972. Service météorologique du Liban, Observatoire de Ksara : *Carte pluviométrique du Liban au 1/200 000* avec notice. Beyrouth, Ministère des Travaux publics et des transports, Direction générale l'aviation civile, 39 p.
- Plassard, J. 1973. Etude de la variabilité des pluies annuelles à Beyrouth (1876-1972). Ksara, *Annales-Mémoires de l'observatoire de Ksara*, tome 3, cahier 1, 24 p.
- Rey, J. 1954. Service météorologique du Liban, Observatoire de Ksara : *Carte pluviométrique du Liban au 1/200 000*, avec notice. Beyrouth, Ministère des Travaux publics et des transports, Direction générale l'aviation civile.
- Sanlaville, P. 1977. *Etude géomorphologique de la région littorale du Liban*. Tome 1, Beyrouth, Publications de l'Université Libanaise, 400 p.
- Saporta, G. 1990. *Probabilités, analyse des données et statistiques*. Technip, Édition Technip, Paris, 493 p.
- Shérer, J.-C. 1977. Une méthode d'extrapolation dans l'espace de données pluviométriques moyennes. Application à une partie des Vosges. *Recherches Géographiques*, Strasbourg, 4 : 69-85.
- Traboulsi, M. 2004. Les précipitations au Proche-Orient : Variabilité spatio-temporelle et relation avec la dynamique de l'atmosphère (1960-61/1989-90). Thèse de géographie, université de Bourgogne, 233 p.
- Traboulsi, M. et Camberlin, P. 2004. Années arrosées et années sèches au Proche-Orient. Relation avec la circulation atmosphérique régionale. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, volume 1, p. 103-116.